干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

阿尔泰山森林生态系统服务功能及其价值评估

孙庆祥[1,2]，周华荣[1]
（1 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；2 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要：以阿尔泰山森林生态系统为研究对象并依据《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008)，通过利用空间分析的方法对阿尔泰山森林资源二类调查数据处理分析，得到了阿尔泰山不同类型森林生态系统的生态服务价值和阿尔泰山生态服务价值的影响因素。结果表明：阿尔泰山森林生态服务价值量为47 957.79×10^6元·a^{-1}，价值量的大小为：涵养水源＞固碳释氧＞保护生物多样性＞净化大气环境＞保育土壤＞积累营养物质，其中涵养水源是主导服务功能；不同林龄的生态服务价值量呈现为：成熟林＞过熟林＞近熟林＞中龄林＞幼龄林；按照林场划分，各个林场的生态服务价值呈现富蕴林场＞阿勒泰林场＞新疆阿尔泰山两河源自然保护区＞布尔津林场＞青河林场＞哈巴河林场＞福海林场的顺序。

关 键 词：森林生态系统；服务功能；林场；阿尔泰山
文章编号：

森林生态系统对人类的生态环境有着重要贡献[1-2]，影响着生态环境、经济和社会发展[3-4]，森林为社会和地球的生命支持系统起着不可替代的作用[5-6]。我国从20世纪80年代开展相关研究，侯元兆[7]首次评估了森林生态系统服务功能，欧阳志云等[8]探讨了中国陆地生态系统服务的价值，蒋延玲[9]结合COSTANZA[10]的方法研究发现森林生态系统的最大价值反映在生态效益上，其价值是经济价值的3.92倍。干旱区森林在维持干旱区生态系统物质和能量平衡以及干旱区人类活动具有重要的意义[11]。其极易受人类活动的干扰，是全球环境变化最为敏感和脆弱的区域之一[12]。山地森林是干旱区重要的水资源形成区，对内陆河流域的生态健康以及经济发展起着重要的促进作用[13]，是天然的水库和绿色屏障，保护着绿洲的生态安全。干旱区山地森林有利于改善山区生境质量，提高土壤肥力[14]，提高水源涵养能力，保障中下游的水资源供给[15]。

阿尔泰山森林生态系统是新疆陆地生态系统的重要组成，改善着人类居住环境。阿尔泰山森林是我国境内唯一分布的南泰加林，是区域社会经济发展的重要水源涵养林区，其涵养的额尔齐斯河是我国唯一注入北冰洋的河流，发挥着涵养水源、保持水土、控制雪线上升、调节气候等巨大的生态效益[16]，不仅为阿尔泰地区工农业、牧业等社会经济发展及其国土生态安全起到决定性的作用，而且对我国额尔齐斯河下游地区以及哈萨克斯坦、俄罗斯两国相关流域的社会经济发展产生重要的影响。研究区也是宝贵的生物基因库[17]，列入国际《濒危野生动植物种国际贸易公约》的有雪豹、棕熊、北山羊等10多种，其生物多样性和原始基因库在未来科学研究和生物资源开发领域具有极高的科学价值。在国家生态保护总体战略中具有重要地位。对阿尔泰山森林进行评估，有利于森林生态系统的健康发展，为主体功能区划、建立生态评价制度提供技术支撑[18]，同时为政府部门制定林业发展政策以及生态补偿制度奠定理论基础。新疆森林生态系统服务功能从不同区域、不同尺度、不同类型已进行研究[19-21]，但是关于阿尔泰山森林的生态系统服务价值中各个林分的贡献情况，各个林场的生态价值分布情况不清楚。为量化各类植被以及林场

收稿日期：2019-09-16；　**修订日期：**2020-02-25
基金项目：国家自然科学基金项目(41171157)；阿尔泰山生态保护管理规划项目；新疆区域空间生态环境评价暨"三线一单"项目
作者简介：孙庆祥(1990-)，男，硕士研究生，研究方向为干旱区环境评价与生态规划. E-mail: sunqingxiang17@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：周华荣(1960-)，男，博士，研究员，研究方向为环境评价与景观生态. E-mail: zhouhr@ms.xjb.ac.cn

的生态服务功能价值，本文依据《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721-2008)[22]，以森林资源二类调查数据为基础，对阿尔泰山林分以及不同林场的生态服务功能进行分析。

1 研究区概况

中国境内为阿尔泰山的中段南麓，地理位置在45°00′～49°10′ N，85°31′7～91°01′ E之间(图1)。森林主要分布在阿尔泰山海拔1 400～2 800 m的中山带，阿尔泰山森林生态系统为寒温带泰加林类型。年日照时数2 157.4 h，年平均温度为0.7 ℃，年降水量400～900 mm，年蒸发量980～1 150 mm，年均相对湿度65 %。阿尔泰山林区东西长500 km，南北宽80～250 km，阿尔泰山林区总面积2.75×10⁶ hm²，森林覆盖率45.73 %，全部为公益林。林地面积、森林面积分别占全疆山地森林的41 %、45 %，占阿勒泰地区林地面积、森林蓄积量的58 %、90 %。

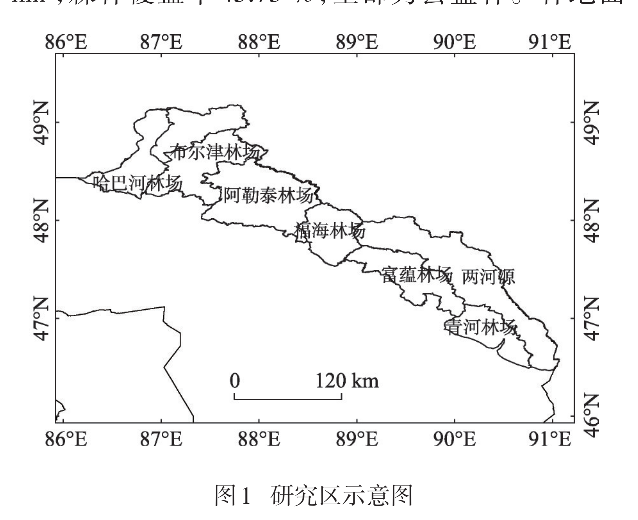


图1　研究区示意图

Fig. 1　Study area shown in the map

根据2014年森林资源二类补充调查报告，优势树种有西伯利亚云杉(*Picea obovata*)、西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)、西伯利亚红松(*Pinus sibirica*)、西伯利亚冷杉(*Abies sibirica*)；灌木林总面积为0.58×10⁶ hm²，主要有绣线菊(*Spiraea spp.*)、刚毛忍冬(*Lonicera hispida*)、锦鸡儿(*Caragana spp.*)和其他其他灌林[19,23]。

2 研究方法

2.1 数据来源

数据来源包括：(1)2014年森林资源二类调查数据和《森林生态系统服务功能评估规范》中的社会公共数据。(2)森林生态系统观测站监测数据，主要来源于已发表的研究成果及网络共享数据库。包括主要林分年地表径流量、年蒸散量、年降水量、林分年净生产力等参数(表1)。

2.2 指标选取及计算

本研究采用《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008)中的指标和公式，主要从涵养水源、保育土壤、固碳释氧、积累营养物质、净化大气环境、保护生物多样性6个方面评价阿尔泰山森林生态服务功能价值，考虑到山地森林缺少大气污染物的来源与可达性路径，因此本文将净化大气环境视为潜在服务功能。

表1　阿尔泰山森林不同林分相关生态参数

Tab. 1　Ecological parameters of different stands

林分类型	蒸发量 / mm	降水量 / mm	地表径流深 / mm	林分净生产力 / $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	土壤年固碳量 / $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	林分氮元素含量/%	磷元素含量/%	钾元素含量/%	负离子浓度 / 个·cm^{-3}
西伯利亚冷杉	151.57	253.14	2.78	1.57	3.93	1.36	0.08	0.90	1 800.00
西伯利亚云杉	155.19	250.06	2.75	1.49	3.73	1.36	0.08	0.90	1 800.00
西伯利亚落叶松	141.31	267.31	2.94	2.53	6.34	1.36	0.08	0.90	1 800.00
西伯利亚红松	145.50	235.00	2.59	10.16	25.41	1.36	0.08	0.90	1 800.00
樟子松	145.50	235.00	2.59	10.16	25.41	1.36	0.08	0.90	1 800.00
桦木	142.66	247.15	2.72	14.19	35.47	0.52	0.34	0.15	617.00
榆树	149.15	250.14	2.75	8.15	20.39	0.50	0.34	0.58	617.00
杨树	155.65	253.13	2.78	2.12	5.31	0.48	0.35	1.02	617.00
柳树	149.15	250.14	2.75	8.15	20.39	0.50	0.34	0.58	617.00
灌木	130.21	253.29	2.79	2.67	6.68	1.10	0.24	0.48	730.00

灌木类型包括绣线菊、刚毛忍冬、沙棘、新疆圆柏、圆叶桦、锦鸡儿、多刺蔷薇

3 结果与分析

3.1 森林生态效益变化

由表2可知，阿尔泰山森林生态系统生态服务价值为47 957.79×10^{6}元·a^{-1}，其中涵养水源23 141.16×10^{6}元·a^{-1}，保育土壤2 414.39×10^{6}元·a^{-1}，固碳释氧9 738.63×10^{6}元·a^{-1}，积累营养物质363.65×10^{6}元·a^{-1}，净化大气环境3 553.07×10^{6}元·a^{-1}，保护生物多样性8 746.88×10^{6}元·a^{-1}。涵养水源、固碳释氧以及保护生物多样性在生态系统服务功能价值的比例为48.25%、20.31%和18.24%，这三类占到阿尔泰山森林生态系统服务功能总价值的86.80%，是主要的生态系统服务功能。阿尔泰山森林服务功能价值为：涵养水源＞固碳释氧＞保护生物多样性＞净化大气环境＞保育土壤＞积累营养物质。

表2 阿尔泰山森林生态系统不同林分类型生态服务功能的价值量 / 10^{6}元·a^{-1}

Tab. 2 Value of ecological service function of different forest types in forest ecosystem / 10^6 yuan·a^{-1}

林分	面积 hm^2	涵养水源	保育土壤	固碳释氧	积累营养物质	净化大气环境	保护生物多样性
西伯利亚冷杉	9 868.95	364.16	18.75	141.13	29.61	77.96	49.34
西伯利亚云杉	67 046.2	1 079.44	40.23	1 119.67	87.16	160.91	335.23
西伯利亚落叶松	507 147.6	14 605.85	963.58	6 643.63	101.43	3 042.89	5 071.48
西伯利亚红松	8 884.06	185.68	16.88	89.73	26.65	70.18	266.52
樟子松	0.98	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
桦木	23 287.29	533.28	37.26	360.95	55.89	167.67	116.44
榆树	32	0.64	0.05	0.50	0.02	0.23	0.10
杨树	4 647.33	92.90	7.44	71.75	2.32	33.15	24.56
柳树	17.34	0.35	0.03	0.21	0.01	0.06	0.05
绣线菊	22 5076.14	2 745.93	517.68	517.68	22.51	0.00	1 125.38
刚毛忍冬	39 241.76	529.76	94.18	113.80	7.85	0.00	196.21
沙棘	79.15	0.79	0.18	0.14	0.01	0.00	0.40
新疆圆柏	27 566.8	275.67	63.40	49.62	2.76	0.00	137.83
圆叶桦	75 118.62	751.19	172.77	135.21	7.51	0.00	375.59
锦鸡儿	199.59	1.90	0.46	0.36	0.02	0.00	1.00
多刺蔷薇	10 250.2	121.98	23.58	16.40	0.00	0.00	51.25
其它灌木	199 099.66	1 851.63	457.93	477.84	19.91	0.00	995.50
总计	1 197 563.67	23 141.16	2 414.39	9 738.63	363.65	3 553.07	8 746.88
总价值量				47 957.79			

3.2 以林分划分的价值量

不同林分类型生态服务价值占比中（图2），西伯利亚落叶松占比最大（63.45%），其次为绣线菊（10.28%），不同林分类型生态服务价值大小顺序为：西伯利亚落叶松＞绣线菊＞其他灌木＞西伯利亚云杉＞圆叶桦＞桦木＞刚毛忍冬＞西伯利亚冷杉＞西伯利亚红松＞新疆圆柏＞杨树＞多刺蔷薇＞锦鸡儿＞榆树＞沙棘＞柳树＞樟子松。

从图3可知，各个林分涵养水源价值量前三的为：西伯利亚落叶松＞绣线菊＞其他灌木；保育土壤价值量前三的为：西伯利亚落叶松＞绣线菊＞其他灌木；固碳释氧价值量前三的为：西伯利亚落叶松＞西伯利亚云杉＞绣线菊；积累营养物质价值量前三的为：西伯利亚落叶松＞西伯利亚云杉＞桦

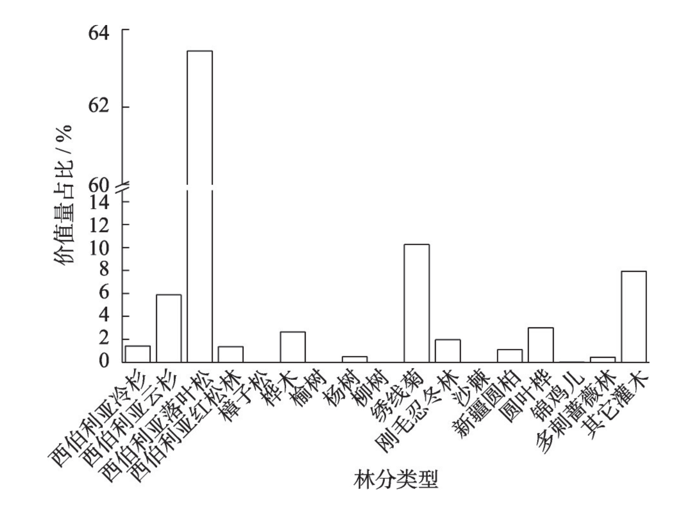


图2 阿尔泰山不同林分类型的生态服务价值量占比

Fig. 2 Proportion of ecological service value of different forest types

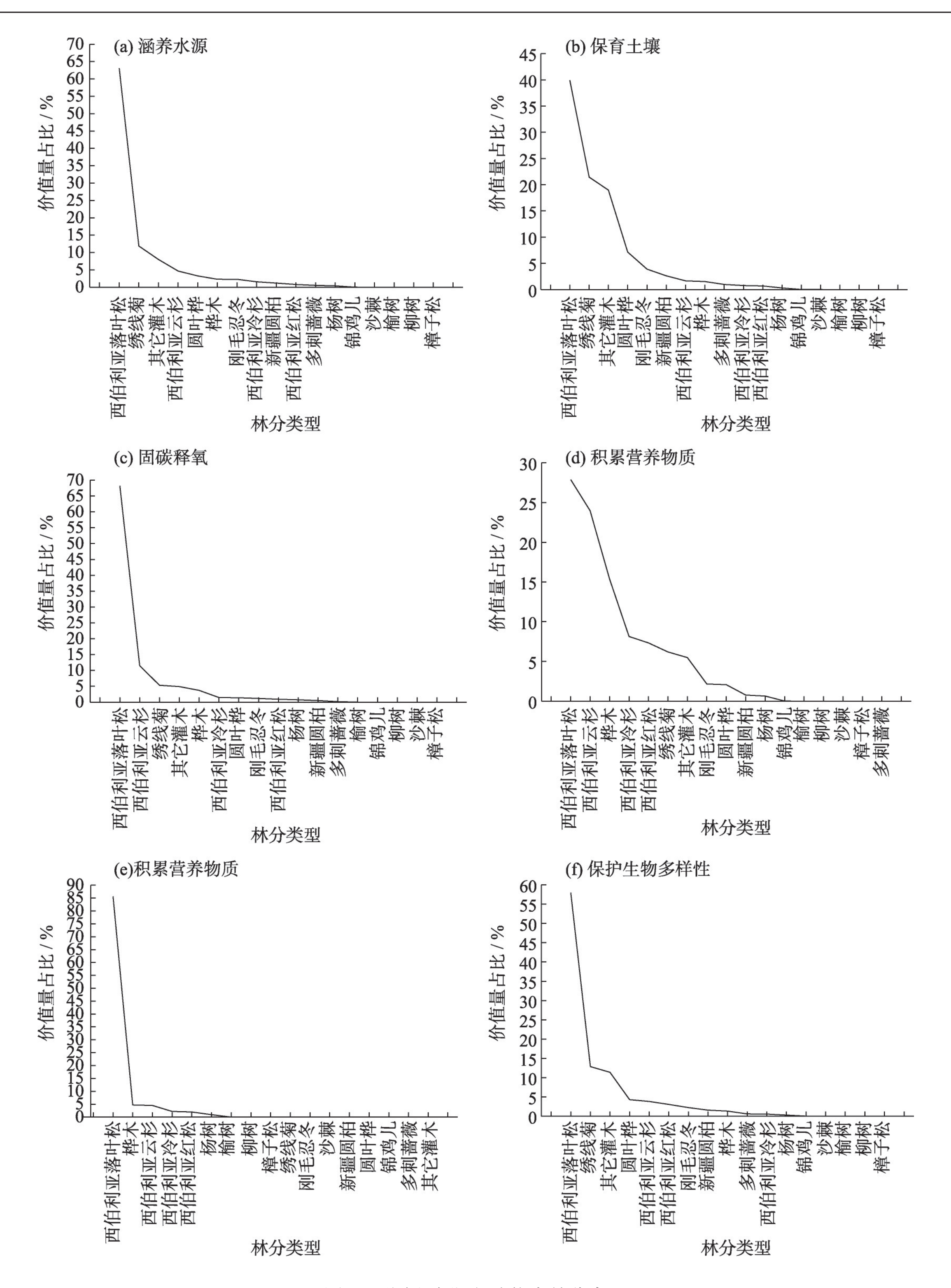


图3　不同生态服务功能中林分占比

Fig. 3　Proportion of forest stands in different ecological service functions

木;净化大气环境价值量前三的为:西伯利亚落叶松＞桦木＞西伯利亚云杉;保护生物多样性价值量前三的为:西伯利亚落叶松＞绣线菊＞其他灌木。

3.3 以林龄划分的价值量

生态服务功能在不同林龄中有所差异,把乔木林按照林龄划分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林,计算不同林龄的价值量(表3)。幼龄林为2.68×10^8 元·a^{-1},中龄林为24.29×10^8 元·a^{-1},近熟林为51.45×10^8 元·a^{-1},成熟林为142.28×10^8 元·a^{-1},过熟林为136.65×10^8 元·a^{-1},呈现为:成熟林＞过熟

表3 不同林龄的生态服务价值量 / 10^8 元·a^{-1}

Tab. 3 Value of ecological services at different forest ages / 10^8 yuan· a^{-1}

林龄	面积hm^2	涵养水源	保育土壤	固碳释氧	营养积累价值	净化大气环境	保护生物多样性价值	总价值量	单位价值 10^4元·hm^{-2}·a^{-1}	占比/%
幼龄林	5 006.87	1.19	0.07	0.72	0.04	0.24	0.41	2.68	5.35	0.01
中龄林	46 982.15	10.65	0.61	7.03	0.47	2.16	3.37	24.29	5.17	0.07
近熟林	90 489.33	23.91	1.51	12.54	0.54	5.04	7.91	51.45	5.69	0.14
成熟林	242 938.8	67.36	4.35	32.64	0.94	14.07	22.93	142.28	5.86	0.40
过熟林	229 160.97	65.43	4.28	30.25	0.64	13.68	22.37	136.65	5.96	0.38
总计	614 578.12	168.53	10.82	83.18	2.62	35.19	57.00	357.35	5.81	1.00

林＞近熟林＞中龄林＞幼龄林的顺序。成熟林所占比例最大，达到39.82%，其次为过熟林(38.24%)，近熟林(14.40%)，中龄林(6.80%)，幼龄林(0.75%)。成熟林和过熟林占到总价值量的78.06%。不同龄林中落叶松和云杉作为优势树种，其生态服务价值量占比远远大于其他树种(图4)。

3.4 不同林场生态服务功能价值

以新疆阿尔泰山国有林管理局管辖的范围进行调查，即7个区域：阿勒泰林场、布尔津林场、福海林场、富蕴林场、哈巴河林场、新疆阿尔泰山两河源自然保护区、青河林场，计算不同林场的生态服务价值。

不同林场的生态服务价值存在着很大的差异性(表4)，阿勒泰林场为83.05×10^8 元·a^{-1}，布尔津林场为63.00×10^8 元· a^{-1}，福海林场为38.23×10^8 元· a^{-1}，富蕴林场为102.85×10^8 元·a^{-1}，哈巴河林场为55.22×10^8 元·a^{-1}，新疆阿尔泰山两河源自然保护区为78.82×10^8 元·a^{-1}，青河林场为58.88×10^8 元·a^{-1}。富蕴林场的生态服务价值总量最高，福海林场的生态服务价值总量最低。不同林场的生态服务价值为：富蕴林场＞阿勒泰林场＞新疆阿尔泰山两河源自然保护区＞布尔津林场＞青河林场＞哈巴河林场＞福海林场。

利用ArcGIS的分区统计与关联合并方法，结合各林场行政区边界数据，以林场行政区为单元将价值量按照自然间断分级，得到阿尔泰山森林生态系

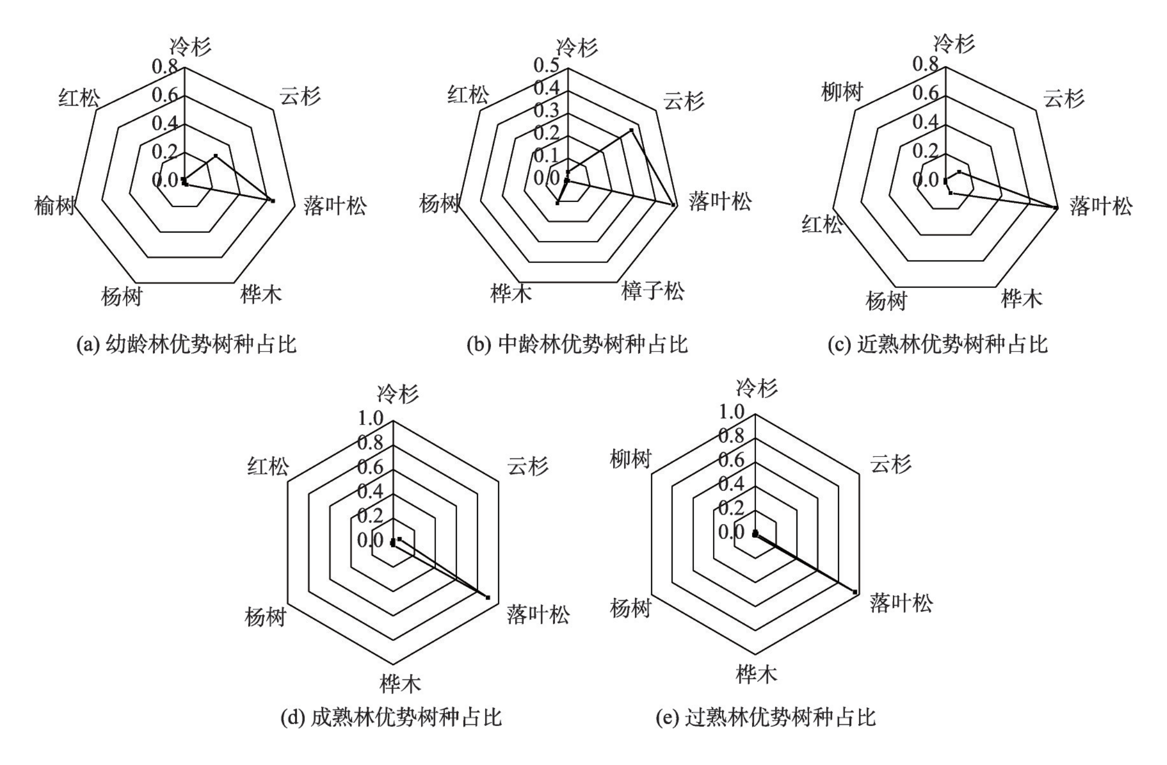


图4 不同龄林中优势树种生态服务功能价值占比

Fig. 4 Proportion of ecological service value of dominant tree species in different age forests

表4 阿尔泰山不同林场的生态服务功能价值量 / 10^8 元·a^{-1}

Tab. 4 Value of ecological service functions of different forest farms / 10^8 yuan·a^{-1}

林场	林地面积 hm²	涵养水源	保育土壤	固碳释氧	营养积累	净化大气环境	保护生物多样性	合计	林场单位价值 10^4元/(hm^2·a^{-1})
阿勒泰林场	240 382.3	40.91	4.95	15.80	0.57	5.10	15.71	83.05	3.45
布尔津林场	175 149.85	30.90	3.63	12.31	0.66	4.18	11.31	63.00	3.60
福海林场	102 598.1	17.38	1.95	10.41	1.06	2.30	5.13	38.23	3.73
富蕴林场	281 890.97	42.16	5.62	33.21	2.70	5.07	14.09	102.85	3.65
哈巴河林场	149 949.04	27.73	3.17	10.13	0.49	3.61	10.08	55.22	3.68
新疆阿尔泰山两河源自然保护区	201 171.45	38.15	4.17	15.57	0.36	5.80	14.77	78.82	3.92
青河林场	207 318.86	29.21	4.56	9.77	0.28	2.62	12.44	58.88	2.84

统服务功能价值的空间分布(图5),价值量在空间分布上表现出明显的空间差异。富蕴林场在保育土壤、固碳释氧、营养物质积累价值量是最大的,净化大气环境价值量最大的是新疆阿尔泰山两河源自然保护区,保护生物多样性价值量最大的是阿勒泰林场。

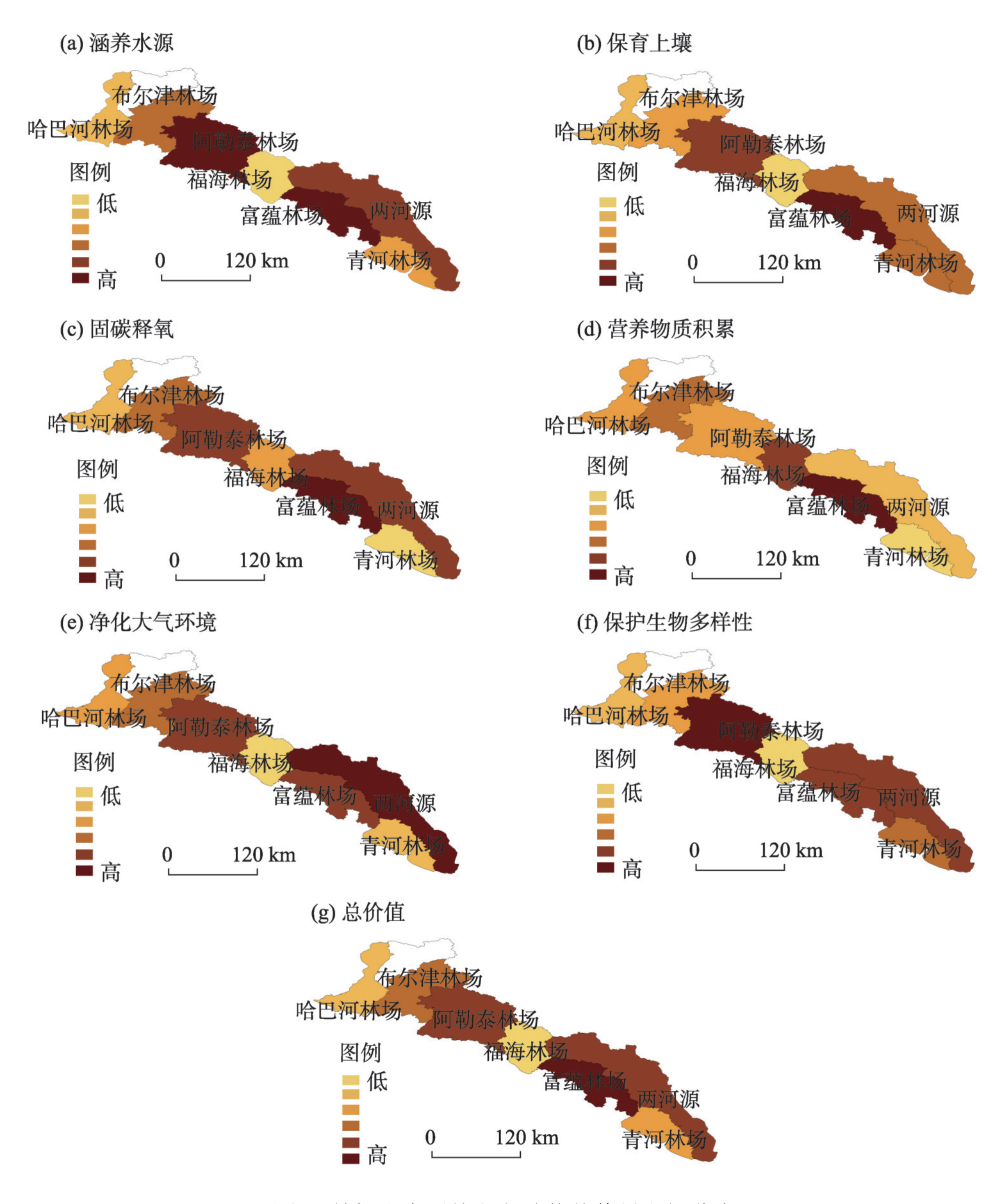


图5 林场生态系统服务功能价值量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of value of ecosystem service functions

各个林场优势树种的生态服务价值存在差异(图6)，阿勒泰林场的优势树种为落叶松(53%)、绣线菊(18%)；布尔津林场的优势树种为落叶松(48%)、绣线菊(12%)；福海林场的优势树种为落叶松(48%)、云杉(23%)、绣线菊(18%)；富蕴林场的优势树种为落叶松(75%)、云杉(6%)；哈巴河林场的优势树种为落叶松(52%)、绣线菊(17%)；新疆阿尔泰山两河源自然保护区的优势树种为落叶松(72%)、绣线菊(5%)；青河林场的优势树种为落叶松(42%)、绣线菊(19%)。

4 讨 论

阿尔泰山森林生态系统服务价值量显著，以涵养水源、固碳释氧以及保护生物多样性为主。这和关于新疆森林的相关研究中以涵养水源、固碳释氧以及保护生物多样性的结果是一致的，以及李少宁[24]得到大岗山森林以涵养水源为主的结论相同。森林对于涵养水源发挥着重要的作用，能够改善局部土壤水分的空间分布[25]，对降雨进行再分配[26]，调节河流径流的作用[27-28]。新疆北疆地区气温上升使得水循环过程加速[29]，以及冰川是径流的重要补给源[30]，这些因素促进着森林的涵养水源服务功能。但是在热带和亚热带森林，森林的固碳释氧功能对生态系统价值的贡献最大[2]，中国森林生态服务功能价值整体呈现东高西低、南高北低的特征[31]。

阿尔泰山森林提供的生态服务功能价值明显，森林生态系统总生态经济价值在2014年为479.58×10^8 元·a^{-1}，相当于2014年阿勒泰地区GDP(226.70×10^8 元)的2.12倍。可见，森林的价值不仅是为人类的生产和生活提供原材料，而且具有重大的生态防护价值。西伯利亚落叶松林的服务功能价值最高。西伯利亚落叶松为阿尔泰山的优势树种，覆盖面积大。落叶松属是强阳性树种，其种子具翅，根系可塑性强，在严酷的生境条件有较强的适应能力[32]。

阿尔泰山森林生态服务价值以成熟林价值最高。过熟林单位面积的价值较高，与过熟林的冠幅较大，根系丰富，枯落物层较厚等因素有关[31]。但是成熟林和过熟林的面积过大，随着林龄增加，林分郁闭度变高，林下植被种类减少[33]，以及林下更新困难，在树种之间的竞争表现出脆弱性[32]。因此应对林龄较高的树种进行合理的疏伐，改善林下水分和光照条件；增加林下植被多样性，改善林分立地质量；对于林龄较低的林地应尽量减少人为的干扰。

森林生态系统服务价值与森林自然度有着紧密的关联，不同林分类型自然度存在差异[34]。自然度为区域自然环境本底性质的程度，可以使用植被来作为量度，自然度的大小在一定程度上与区域原

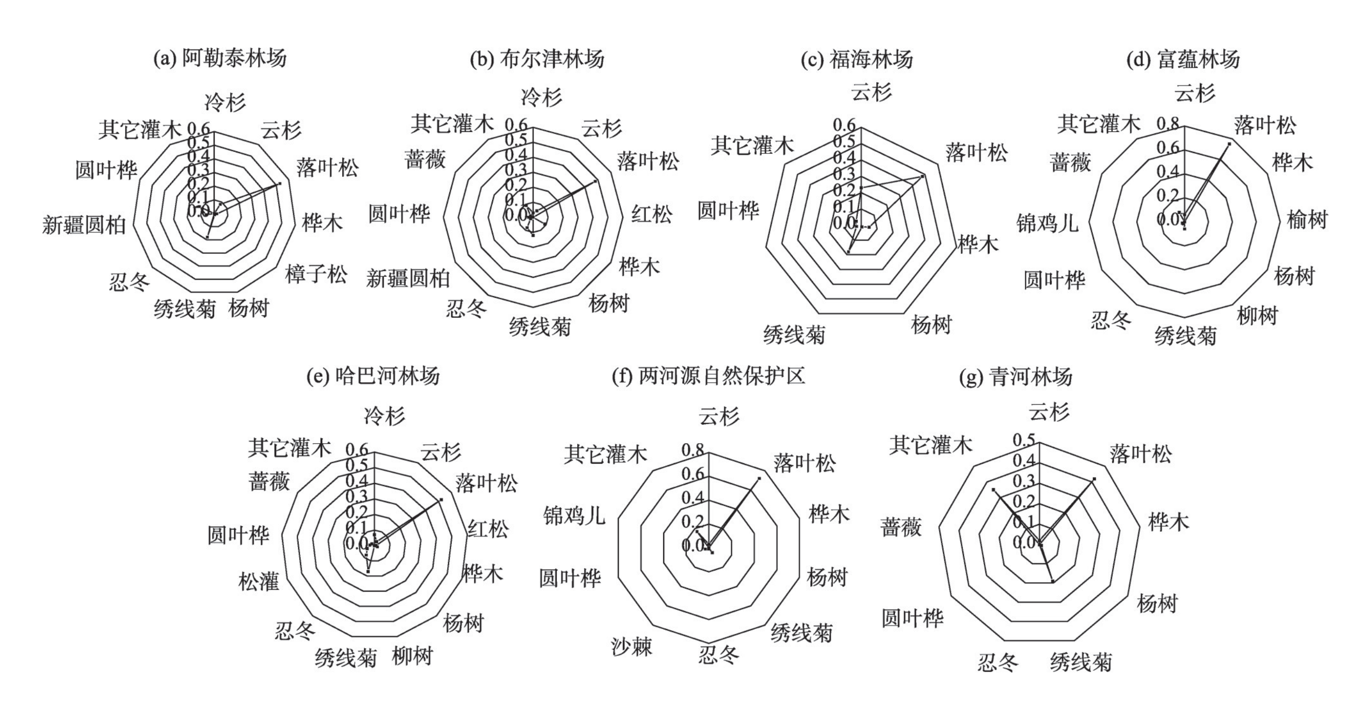


图6 林场中不同林分生态服务功能价值占比

Fig. 6 Proportion of ecological service function value of different stands in forest farms

生植被的面积有关[35]。可知研究区森林自然度按照林分类型划分为:西伯利亚落叶松 > 西伯利亚云杉 > 桦木 > 西伯利亚冷杉,同时各个林分类型的生态系统服务价值为:西伯利亚落叶松 > 西伯利亚云杉 > 桦木 > 西伯利亚冷杉。可知,若从林分方面分析森林生态系统服务价值与森林自然度有一定的正相关。良好的森林自然度能够改善生态系统的结构和功能[36],森林自然度评价为山区生态建设提供参考。森林是一个复杂生态系统,仅从单因素来分析生态系统服务价值与自然度的关系有所不足,尚需要在今后进行更深入的分析研究。

5 结 论

本文对阿尔泰山森林生态系统服务功能及其价值进行评估,结论如下:

(1)阿尔泰山森林生态服务价值量为47 957.79×10^6 元·a^{-1},价值量的大小为:涵养水源 > 固碳释氧 > 保护生物多样性 > 净化大气环境 > 保育土壤 > 积累营养物质,以涵养水源、固碳释氧、保护生物多样性为主。

(2)不同林分的生态效益为:西伯利亚落叶松 > 绣线菊 > 其他灌木 > 西伯利亚云杉 > 圆叶桦 > 桦木 > 刚毛忍冬 > 西伯利亚冷杉 > 西伯利亚红松 > 新疆圆柏 > 杨树 > 多刺蔷薇 > 锦鸡儿 > 榆树 > 沙棘 > 柳树 > 樟子松。

(3)不同林龄的生态服务价值为:成熟林 > 过熟林 > 近熟林 > 中龄林 > 幼龄林,以成熟林和过熟林为主。在阿尔泰山森林的经营管理中,应注重对中龄林和幼龄林的生长情况的监测,采取自然与人工结合的方式增加中龄林和幼龄林的面积,保证森林各林分的良性比例。

(4)根据阿尔泰山不同林场,生态服务价值大小为:富蕴林场 > 阿勒泰林场 > 新疆阿尔泰山两河源自然保护区 > 布尔津林场 > 青河林场 > 哈巴河林场 > 福海林场。各个林场的优势树种主要以落叶松和绣线菊为主。

参考文献(References)

[1] CAIRNS J. Protecting the delivery of ecosystem services[J]. Ecosystem Health, 1997, 3(3).

[2] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2005, (8): 2096-2102. [YU Xinxiao, LU Shaowei, JIN Fang, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, (8): 2096-2102.]

[3] JIA H C, PAN D H, ZHANG W C. Health assessment of wetland ecosystems in the Heilongjiang River Basin, China[J]. Wetlands, 2015, 35(6): 1185-1200.

[4] 马志波, 孙伟, 黄清麟. 森林生态系统服务的价值评估和补偿:概念、原则和指标[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(5): 263-268. [MA Zhibo, SUN Wei, HUANG Qinglin. Valuation and payments for forest ecosystem service: concepts, principles and indicators [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(5): 263-268.]

[5] ONAINDIA M, FERNANDEZ de Manuel, BEATRIZ, et al. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 289: 1-9.

[6] RONALD C, FRANCISCO E, DANIEL M L, et al. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among, timber production, carbon sequestration, and water, yield in *Pinus elliotii* forests in southeastern USA[J]. Forests, 2014, 5(6): 1409-1431.

[7] 侯元兆, 王琦. 中国森林资源核算研究[J]. 世界林业研究, 1995, (3): 51-56. [HOU Yuanzhao, WANG Qi. A study on the accounting of forest resources in China[J]. World Forestry Research, 1995, (3): 51-56.]

[8] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, (5): 635-640. [OUYANG Zhiyun, WANG Rusong, ZHAO Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, (5): 635-640.]

[9] 蒋延玲, 周广胜. 中国主要森林生态系统公益的评估[J]. 植物生态学报, 1999, (5): 426-432. [JIANG Yanling, ZHOU Guangsheng. Estimation of ecosystem services of major forest in China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1999, (5): 426-432.]

[10] COSTANZA R, DARGE R, DE-GROOT R, et al. The value of the world´s ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[11] CAMACHO-VALDEZ V, RUIZ-LUNA A, GHERMANDI A, et al. Effects of land use changes on the ecosystem service values of coastal wetlands[J]. Environ Manage, 2014, 54(4): 852-864.

[12] MAROSCHEK M, RAMMER W, LEXER M J. Using a novel assessment framework to evaluate protective functions and timber production in Austrian mountain forests under climate change[J]. Reg Envir Chang, 2015, 15(8): 1543-1555.

[13] 陈曦, 姜逢清, 王亚俊, 等. 亚洲中部干旱区生态地理格局研究[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 385-390. [CHEN Xi, JIANG Fengqing, WANG Yajun, et al. Characteristics of the eco-geographical pattern in arid land of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 385-390.]

[14] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山中段青海云杉林土壤肥力质量评价研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1368-1377. [MA Jian,

LIU Xiande, LI Guang, et al. Evaluation on soil fertility quality of *Picea crassifolia* forest in middle Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1368−1377.]

[15] 何志斌, 杜军, 陈龙飞, 等. 干旱区山地森林生态水文研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1078−1089. [HE Zhibin, DU Jun, CHEN Longfei, et al. Review on montane forest eco-hydrology in arid area[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(10): 1078−1087.]

[16] 朱雅丽, 张绘芳, 高亚琪, 等. 新疆西伯利亚落叶松含碳系数分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): : 98−202. [ZHU Yali, ZHANG Huifang, GAO Yaqi, et al. Analysis on carbon content factors of *Larix sibirica* Ledeb. in Xinjiang[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2017, 41(3): : 98−202.]

[17] 曹秋梅. 新疆阿尔泰山植物多样性全球突出普遍价值[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2015. [CAO Qiumei. The global outstanding universal value of plant diversity in Altai Mountains, Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.]

[18] 冯继广, 丁陆彬, 王景升, 等. 基于案例的中国森林生态系统服务功能评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1375−1382. [FENG Jiguang, DING Lubin, WANG Jingsheng, et al. Case-based evaluation of forest ecosystem service function in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1375−1382.]

[19] 肖中琪, 张毓涛, 李吉玫. 新疆森林生态系统服务功能价值评估[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2019, 36(4): 483−490. [XIAO Zhongqi, ZHANG Yutao, LI Jimei, et al. Assessment of service function value of forest ecosystem in Xinjiang province, China[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 2019, 36(4): 483−490.]

[20] 兰洁, 张毓涛, 师庆东, 等. 新疆天然林生态系统服务功能价值评估[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 289−296. [LAN Jie, ZHANG Yutao, SHI Qingdong, et al. Assessment of service function value of the natural forest protection program in Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 289−296.]

[21] 黄继红, 路兴慧, 郭仲军. 新疆布尔津林场天然林生态系统服务功能评估[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 866−873. [HUANG Jihong, LU Xinghui, GUO Zhongjun. Service functions of the natural forest ecosystem in Burqin forest farm, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 866−873.]

[22] 国家林业局. LY/T1721—2008森林生态系统服务功能评估规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1−6. [State Forestry Administration[S]. LY/ T1721−2008 Specifications for assessment of forest ecosystem services in China[S]. Beijing: China Standard Press, 2008: 1−6.]

[23] 白志强, 李缓, 王文栋, 等. 阿尔泰山优势树种的生物量模型构建及其生物量分配特征[J]. 林业资源管理, 2018, (4): 34−40. [BAI Zhiqiang, LI Yuan, WANG Wendong, et al. Biomass model establishment and allocation of dominant tree species in Altai Mountains[J]. Forest Resources Management, 2018, (4): 34−40.]

[24] 李少宁, 王兵, 郭浩, 等. 大岗山森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 中国水土保持科学, 2007, (6): 58−64. [LI Shaoning, WANG Bing, GUO Hao, et al. Assessment of forest ecosystem services value in Dagangshan [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, (6): 58−64.]

[25] 韩姣姣, 段旭, 赵洋毅. 金沙江干热河谷不同植被坡面土壤水分时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 121−129. [HAN Jiaojiao, DUAN Xu, ZHAO Yangyi. Spatial and temporal variability of soil moisture on slope land of different vegetation of dry-hot valley in Jinsha River[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 121−129.]

[26] ZHANG B A, LI W H, XIE G D, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecol Econ, 2010, 69(7): 1416−1426.

[27] 王忠诚, 华华, 王淮永, 等. 八大公山国家级自然保护区林地水源涵养功能研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(2): 95−101. [WANG Zhongcheng, HUA Hua, WANG Huaiyong, et al. Research on forestland water conservation function of Badagong Mountain nature reserve[J]. Journal of Central South University of Forestry&Technology, 2014, 34(2): 95−101.]

[28] 赵丽, 王建国, 车明中, 等. 内蒙古扎兰屯市典型森林枯落物、土壤水源涵养功能研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 91−96. [ZHAO Li, WANG Jianguo, CHE Mingzhong, et al. Forest litter, soil characteristics and water conservation function of typical forest in Zhalantun, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(5): 91−96.]

[29] 冯克鹏, 田军仓, 沈晖. 基于K-means聚类分区的西北地区近半个世纪气温变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1239−1252. [FENG Kepeng, TIAN Juncang, SHEN Hui. Temperature variation characteristics of northwest China based on K-means clustering partition in the past half century[J]. Arid Land Geography. 2019, 42(6): 1239−1252.]

[30] 刘潮海, 施雅风, 王宗太, 等. 中国冰川资源及其分布特征——中国冰川目录编制完成[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 106−112. [LIU Chaohai, SHI Yafeng, WANG Zongtai, et al. Glacier resources and their distributive characteristics in China: A review on Chinese glacier inventory[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(2): 106−112.]

[31] 漆信贤, 黄贤金, 赖力. 基于Meta分析的中国森林生态系统生态服务功能价值转移研究[J]. 地理科学, 2018, 38(4): 522−530. [QI Xinxian, HUANG Xianjin, LAI li. An empirical study of meta-analytical value transfer of forest ecosystem services in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(4): 522−530.]

[32] 周以良. 中国的几种植被类型(Ⅵ)落叶针叶林[J]. 生物学通报, 1988, (5): 6−10. [ZHOU Yiliang. Several vegetation types in China (Ⅵ) deciduous coniferous forest[J]. Bulletin of Biology, 1988, (5): 6−10.]

[33] 纪文婧. 山西太岳山不同林龄华北落叶松人工林养分特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016. [JI Wenjing. Nutrient character-

istic by stand age in Larix principis-ruppechtii plantation in Taiyue Mountain, Shanxi[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.]

[34] 彭舜磊, 王得祥. 秦岭主要森林类型近自然度评价[J]. 林业科学, 2011, 47(1): 135-142. [PENG Shunlei, WANG Dexiang. Naturalness assessment of the main forest communities in Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(1): 135-142.]

[35] 屠玉麟. 自然保护区评价的"自然度"方法[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1991, (2): 9-14. [TU Yulin. The method of natural degree in natural reserve evalution[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences), 1991, (2): 9-14.]

[36] 彭舜磊, 吕建华, 陈昌东, 等. 宝天曼自然保护区主要森林类型自然度评价[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8164-8173. [PENG Shunlei, LV Jianhua, CHEN Changdong, et al. Naturalness assessment of the main forest types in the Baotianman national nature reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8164-8173.]

Service function and value evaluation of the Altai Mountains forest ecosystem

SUN Qing-xiang[1,2], ZHOU Hua-rong[1]

(1 *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*;
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The Altai Mountains forest is the only southern Taiga forest in China, and it is an important water conservation forest area for regional social and economic development. The Irtysh River it conserves is the only river in China that flows into the Arctic Ocean. Forests have ecological benefits such as water conservation, water and soil maintainance, snow line rise control, and climate regulation. The Altai Mountains forest plays a decisive role in the Altai region's social and economic development, such as industry, agriculture, animal husbandry, and territorial ecological security. The forest also contributes to the social and economic development of the lower reaches of the Irtysh River in China and influences the relevant watersheds of Kazakhstan and Russia. The Altai Mountains forests are mainly distributed in the mid-mountain zone at 1400-2000 m, which is a cold temperate Taiga forest type, and the forest coverage rate is 45.73%. To quantify the value of the ecological services of various types of vegetation and forest farms, this study follows "Specifications for assessment of forest ecosystem services in China" (LY/T 1721-2008). Based on second-level survey data of forest resources, this paper analyzes forest types and the service functions of different forest farms. The results are as follows. The value of forest ecological services in the Altai Mountains forest is 47,957.79 × 106 yuan · a^{-1}. The value of ecosystem services consists of water conservation, carbon fixation and oxygen release, biodiversity protection, atmospheric purification, soil conservation, and nutrient accumulation. Most of the value of ecological services for different forest ages comes mainly from mature and overmature forests. The value of ecosystem services, from highest to lowest is as follows: mature forest, overmature forest, near-mature forest, middle-age forest, and young forest. To achieve improve the proportion of forest age it is recommended to reasonably thin trees of higher forest age and reduce human disturbances to lower age forests. Forest ecosystems are divided according to forest farms, and the values of ecosystem services from the Altai Mountains forest from highest to lowest, are from the following farms: Fuyun Forest Farm, Altai Forest Farm, Xinjiang Altay Mountains Two River Source Nature Reserve, Burqin Forest Farm, Qinghe Forest Farm, Habahe Forest Farm, and Fuhai Forest Farm. Mountain forests are a natural barrier for protecting oases, making them an important guarantee for maintaining ecological security in Xinjiang and the foundation of sustainable social and economic development. Evaluating the service function value of the forest ecosystem in the Altai Mountains provides guidance for the scientific management of forest resources. It also has important theoretical and practical significance for establishing an ecological compensation system.

Key words: forest ecosystem; service function; forest farms; Altai Mountains